第 37 卷第 12 期 生 态 学 报 Vol.37,No.12
2017 年 6 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Jun.,2017

DOI: 10.5846/stxb201606161164
徐霞,成亚薇,江红蕾,李霞,刘颖慧.风速变化对草原生态系统的影响研究进展.生态学报,2017,37(12):4289-4298.
Xu X, Cheng Y W, Jiang H L, Li X, Liu Y H.Research progress of the effects of wind speed change on grassland ecosystem.Acta Ecologica Sinica,2017,37(12):4289-4298.

风速变化对草原生态系统的影响研究进展

徐 霞*,成亚薇,江红蕾,李 霞,刘颖慧
北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室资源学院,地理科学学部, 北京 100875

摘要:在全球风速呈下降趋势的大背景下,研究风速变化对生态系统的影响具有重要意义,尤其是其重要组成部分——草原生态系统。近年来大量学者开始研究风速变化对草原生态系统的影响,主要集中在以下几个方面并得出相关的结论,(1)风速变化会影响植物的生长速率和叶片形态,适当的风速能够促进植物生长发育、提高植被初级生产力,而强风或持续大风不仅会对植物产生破坏作用,还会影响其生长发育;(2)风会最先带走地表细小颗粒,从而导致土壤质地变粗、水分下降、营养成分重新分配;(3)风引起地表边界层和大气边界层物质和能量的转移和交换,热量和水汽的交换导致地表微气候发生变化,如风速降低会导致地表温度升高;(4)风力作用使得土壤水分亏缺、营养成分变化,导致草原生态系统结构变化、草地覆盖度降低、物种生活型复杂化、耐旱植物增加;(5)大气稳定性、CO_2交换速率和碳排放都会随着风速的增加而增加,碳吸收则相反,碳通量也因此发生变化。综上,风速降低对于草原生态系统的影响复杂且利弊相当,未来的发展趋势会更加侧重于以下几个方面的发展:研究对象的多样化、加强控制实验的定量化研究、综合多要素的相互作用机理研究、整体结构和功能性的研究。

关键词:风速变化;草原生态系统;生理性状;生态系统结构;碳通量

Research progress of the effects of wind speed change on grassland ecosystem

XU Xia*, CHENG Yawei, JIANG Honglei, LI Xia, LIU Yinghui
State Key Laboratory of Earth Surface Progress and Resources Ecology, College of Resources Science & Technology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, *China*

Abstract: Under the context of wind-reducing worldwide, researching the effects of wind speed change on grassland ecosystem, which plays an important role in terrestrial ecosystem, has important significances. The experiment results over decades show that: (1) wind speed change impacts plant growth rates and leaf shapes. Appropriate wind speed can improve plant growth and enhance the primary productivity. But strong wind or continuous wind might damage plant; (2) Wind takes away soil fine particles (e.g., silt and clay) from soil surface first, which lead to soil structural change, soil moisture reduction and the redistribution of nutrients; (3) Wind induces the transfer and exchange of materials and energy between land surface and atmosphere, which can change the surface micro - climate. For example, soil surface temperature will rise due to reduced wind; (4) Wind can decrease the soil moisture and change the nutrient component, making grassland ecosystem structure varied, grassland cover decreased, plant life forms complicated and drought-tolerant plants increased; (5) Atmospheric stability, CO_2 exchange rate and carbon emission increase with wind speed acceleration. Carbon absorption is the opposite. As a result, carbon flux also changes. Above all, It has its pros and cons for the effect of wind speed decrease on grassland ecosystem. In the future, the study will be more focused on the following aspects: Research object diversification; Quantitative study by strengthening the control of experiment; Comprehensive interaction mechanism of multi

基金项目:国家自然科学基金创新团队项目(41321001);地表过程与资源生态国家重点实验室资助项目(2014-zy-04);中央高校科研业务费专项资金资助(310421103)
收稿日期:2016-06-16; **修订日期**:2017-01-16
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: xuxia@ bnu.edu.cn

factor; the overall structure and functional study.

Key Words: wind change; grassland ecosystem; plant physiological characters; ecosystem structure; carbon flux

草原生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,全球草原面积占陆地总面积的25%以上[1]。草原生态系统具有维持生物多样性、保持全球二氧化碳平衡和促进物质循环、提高土壤稳定性、改善小气候等重要的生态系统功能,同时也是受人类活动和气候变化影响最大的陆地生态系统之一[2-4]。草原生态系统在其地上植被和群落动态受到直接影响的同时,各种地下生态过程也会受到直接或间接的影响[5]。草地作为我国重要的土地利用类型,占我国陆地面积的40%,超过100万头牲畜赖以生存,草原对环境可持续发展以及提高食品安全问题起着关键的战略性作用[6]。草原荒漠化已成为我国社会经济和环境可持续发展面临的首要问题,影响着4亿人的生活并且会造成80亿财产损失[7]。风作为生态系统的影响因子之一,参与了生态系统过程中的物质循环和能量流动,从而对生物地球化学循环、区域气候和陆地植被等产生影响;作为地表物质侵蚀、搬运和沉积的主要外营力,风也是引起土壤资源和植物资源再分配的主要动力基础[8-9]。风蚀是一个全球化的现象,它发生在北非、中东、中亚、澳大利亚、北美和中国的许多干旱、半干旱农业地区[10-13]。综合国内外相关研究,作为主要外营力的风对生态系统有着异常复杂的影响,而风速大小直接决定了对生态系统影响的强度。草原生态系统作为陆地生态系统主要的组成部分以及受气候变化影响最大的陆地生态系统,因此研究风速变化对草原生态系统的影响对于草原生态系统的可持续发展具有重要意义。本文从近年来风速的变化以及风速变化对植物、土壤和微气候、草原生态系统结构以及生态系统碳通量等几个方面综述了风速变化对草原生态系统的直接或间接影响。

1 全球及我国风速变化现状

近年来,国内外学者发现全球范围内很多地区风速呈现下降趋势。Iacono对Blue Hill气象台风速数据的分析结果显示:1980年至2008年的近30年间,Blue Hill的年均风速由6.7 m/s递减到5.6 m/s,下降幅度超过10%;同样,意大利、捷克、加拿大、美国和澳大利亚等地区,风速也有不同程度的下降[14-19]。McVicar等人分析了世界各地148组近地表风速的变化趋势,发现风速变化的平均趋势为$-0.014\ m\ s^{-1}\ a^{-1}$。假设变化趋势是线性的,那么相当于说,在过去50年内,风速变化了-0.7 m/s,风速"静止化"已经成为全球性特征[20]。

Guo等人对我国年平均风速的分析也得到相同的结果:自1969年到2005年期间,我国平均风速下降$0.018\ m\ s^{-1}\ a^{-1}$,其中春天风速下降速率最大,为$0.021\ m\ s^{-1}\ a^{-1}$;夏季最小,$0.015\ m\ s^{-1}\ a^{-1}$;我国北部、青藏高原以及东部和东南部的沿海地区,风速下降的程度最为明显,平均每年下降0.02—0.04 m/s[21]。内蒙古地区年平均风速呈现非常显著的减弱趋势($P<0.01$),平均每10年减小0.24 m/s[22-24]。通过世界气候研究计划之第三耦合模式比较计划(WCRP/CMIP3)提供的新一代气候模式(BCC_CSM1.0.1)及模式集成对中国21世纪(2011—2099)近地层(距地表10 m)风速的预估结果显示:21世纪全国年平均风速呈减小趋势,且随着预估情景人类排放的增加,减小趋势越显著,预计我国北部地区风速下降最为显著,约$0.26\ m\ s^{-1}(100a)^{-1}$[23]。

一些研究学者从不同尺度分析了风速降低的主要原因:(1)气候变化导致高海拔大气环流模式的改变;(2)土地利用覆盖和变化(LUCC)致使地表的粗糙度发生变化,改变近地表风的湍流模式;(3)大量的农田、植树造林以及景观管理政策的变更导致植被增加,从而吸收更多的风能;(4)城市的发展和扩张增加了下垫面的粗糙度[25-28]。而对于我国来说,风速下降机制主要包括两个方面:一是温室气体导致全球变暖,从而降低大气对流速率[29];二是人类活动增加空气污染,使得空气中颗粒物浓度增加,从而吸收并反射更多的太阳辐射,使得陆地接受的辐射减少、气温降低,导致夏季风速的下降[29]。风速的变化受到很多因素的影响,但风速的下降并不是某单个因素导致的,而是多个因素共同交互作用的综合影响结果[14,27]。

2　风速变化对植物生理性状的影响

风是显著影响植物生长、发育和分布的主要环境变量之一,关于风对植物的作用已经获得了广泛的研究[30-35]。风对植物生长的影响比较复杂,既有直接作用也有间接作用,风能够通过直接接触改变植物的形态并影响植物的生长,也能通过改变热、水蒸气及二氧化碳的转移和运输来影响气体交换,从而间接影响植物的生理性状[31,36-38];风速的大小对植物的影响具有两面性,适当的风速能够增加植物和土壤以及大气之间的物质与能量的交换,加快植物的生长,但风速过大,超过植物的承受能力时,会使得植物受到一定的损害,反而抑制植物生长[30-32,39-41]。

即使仅短暂暴露于风中都会导致植物大小和叶片面积以及作物产量显著减小[31]。风力作用会改变植物的生长速率和叶片形态,导致植物的茎径向扩张、叶片厚度增加、茎伸长减小和叶面积变小,并且还会影响细胞合成;风引起的植物运动例如植物叶片间的相互摩擦会使叶片上表层蜡质层受到磨损,导致表皮电导性和水分流失增加;当风速超过植物承受力时会导致植物叶片被撕裂、剥离和磨损甚至会直接造成植被倒伏,而被风吹起的土壤颗粒也可能会磨损和破坏植物组织[30-32,39-41]。

风对植物的机械作用也会影响植物的内部结构,继而影响其水分调节和光合生理[35]。风速大小决定着叶片边界层导度,而叶片边界层导度依据能量平衡方程直接影响着植物的光合速率、蒸腾速率以及叶片温度[42]。植物蒸腾速率随着风的强度、持续时间和植物种类的不同而发生不同的变化,风速可以提高植物的蒸腾速率,然而风速超过一定的阈值则会降低蒸腾速率[35]。

无风或低风速条件下,由于植物叶片表面的气体交换和扩散较为缓慢,蒸腾速率和光合速率都会降低,而蒸腾速率降低不利于叶片温度下降,较高的叶片温度可能会导致呼吸作用加强,从而净光合速率降低;轻风对于植物的净光合速率和蒸腾速率则无明显影响;中等风速(和风或劲风)则会促进叶片周围的气体交换,加快蒸腾作用速率,同时也会促进胞间 CO_2 的交换导致胞间 CO_2 浓度升高,加快植物的净光合速率,从而提高植物净初级生产力;而持续的强风或长时间风力作用会使植物受到严重胁迫,叶表面的蜡层对于叶片具有保护功能,而风速过大会导致叶表面受损,从而使得植物控制水分蒸腾的能力大大减弱,气孔大量关闭,气孔导度下降,气体交换阻力增大,气孔蒸腾作用减少,但是强风同时又增加了角质层的蒸腾速率,导致叶片大量失水,从而抵消由于气孔关闭使蒸腾降低的作用,而从光合作用方面来讲,气孔关闭导致胞间气体交换速率降低,胞间 CO_2 浓度下降,叶片温度由于强风吹袭而大幅度降低,进而导致植物的净光合速率严重降低[34-35,43-46]。由于植物的净光合速率和蒸腾速率降低,植物体的光合作用受到抑制,碳同化能力受到抑制,水分利用效率和物质积累降低,植物的高度生长就会愈加缓慢,因此,强风不利于植物体的生长,长期处于风作用下的植物个体普遍矮化、冠幅减小[34-35]。而在采取挡风措施的地区,背风面植物比迎风面的植物发育成熟的早,植被个体高度更高并拥有更大的叶面积[41,47-49]。Hodges 等在 1994 年至 1995 年对美国内布拉斯加州的四季豆进行挡风实验,结果表明,处于背风面的四季豆比迎风面的四季豆有更长的节间长度和更大的干重,叶面积指数也相对较大;而在相比更为干旱的 1995 年,四季豆的总产量和商品产量均高于较为湿润的 1994 年,说明在干旱时期风速变化对四季豆的影响更为明显[50]。

3　风速变化对土壤的影响

草原生态系统主要分布在干旱和半干旱地区,而风蚀现象多发生在这些地区,风作为风蚀现象主要的外营力,对土壤资源起着再分配和搬运的作用,因此,风力作用以及风速的变化对于草原生态系统土壤结构、水分和养分有着明显的影响作用,风速大小直接决定了搬运物质的颗粒大小和形状以及搬运距离,风力作用以及风速的区域差异性对于土壤资源的空间异质性有着显著的影响,地统计学表明,风力作用增加了土壤资源空间尺度的自相关性,却降低了大多数土壤分析物的空间尺度依赖性[51-52]。就风对土壤的结构、水分和养分的影响来说,草原生态系统如果受到长期风力作用或者风力作用加强的影响下,植被赖以生存的土壤质量会

受到不同程度的破坏,土壤结构发生变化、持水能力变差导致水分含量降低、土壤营养元素缺失,从而对土壤表面草原植物产生不利影响,继而影响草原生态系统和周围环境的可持续发展。

3.1 土壤结构

虽然风的搬运能力远不如水,但是水力侵蚀仅能作用于坡地及倾斜的地面,而风力侵蚀能够作用于所有的土壤表面[53]。在风蚀现象中,土壤聚合体的大小和稳定性是影响土壤敏感性的首要因素,风力作用会使土壤中不受侵蚀的聚合体逐渐演变成易受侵蚀的聚合体,然后带走其中的易蚀性颗粒——表层土中的细小颗粒是最先被风力带走的部分[52,54-55]。

大陆性气候地区在 5 月到 9 月间,潜在蒸散和实际蒸散会造成显著的水分亏缺,在这个阶段,地表土壤失去水分而变干,上层土壤表面的作物失去与土壤结合所必需的水分,从而当风速增加到一定的大小就可以移动、吹起、搬运和积累沙子[53]。

半干旱地区的土壤中,粉砂和粘粒的含量占据重要地位,这些颗粒有助于构成抵抗风蚀的土壤结构,减少风蚀搬运率[56-58]。研究表明,在长期风力作用下以及风速变化显著时会致使土壤结构发生显著改变,表层土壤含沙量增加,而粉砂、粘粒含量减少,改变土壤结构,增加风蚀搬运率[59]。

新墨西哥南部的一个典型荒漠草原进行的实验表明,由于一直增强的风力作用,土壤结构发生显著改变,表层土壤颗粒在两年的时间内明显变粗,大小在 250—500μm 的土壤颗粒明显增加,而大小在 50—125μm 以及小于 50μm 的土壤颗粒大量减少[52]。澳大利亚东南部的一个人工草地进行的实验表明,在风力作用下,20 周内>250μm 的土壤颗粒含量增加而粒径为 75—210μm 和<2μm 的颗粒含量减少[60]。在西堪萨斯州的一个农田进行的实验表明,36 年内风蚀导致土壤的含沙量增加了 6.5%,而粉粒含量下降了 7.2%[61]。在中国内蒙古典型草原的一个过度放牧草地和一个人工草地上进行的实验表明,24 年内风蚀导致它们的表层土壤含沙量分别增加了 31.6%和 45.6%[62]。因此,在持续的风力作用下,土壤结构会发生相应的变化。

3.2 水分

土壤结构是影响土壤水分特征的主要因素[63]。土壤中的细小颗粒与水分子结合能力较高,由于增强的风力作用带走大量土壤细小颗粒,改变了土壤结构,导致表层土的土壤持水力受到影响,土壤含水量下降[58]。草原生态系统分布集中的干旱半干旱地区降水量少,风力作用加强地表湍流,导致土壤水分蒸发速度加快,蒸发量增强,最终导致土壤水分亏缺。研究者通过实验证明,受到风力作用的土壤水分蒸发量明显高于未受风力作用的土壤[64-65]。设置风障的实验研究表明,在设置挡风设施的区域,迎风面和背风面的土壤水分含量有很大的区别,挡风设施使得背风面风速减小,促进背风面土壤水分的保持,使得植物在生长季获得更多的可利用水分[47]。金东艳在内蒙古太仆寺旗典型草原的挡风实验研究表明,在整个生长季,设置风障之后,风速降低的区域土壤水分要比未设置风障的区域高出 14.4%[65]。从大的区域尺度来看,季风带来的水汽输送,也显著影响着不同区域的土壤湿度[66]。

3.3 养分

在大陆范围内,风力运输是影响干旱和半干旱地区土壤养分内外流动的主要非生物机制,由于水力运输仅限于在闭合盆地,因此风力运输是干旱和半干旱区土壤养分和颗粒物最主要的运输方式[53,67-69]。

土壤中的细小颗粒除了拥有较高的持水力之外,还控制着有机碳的动态累积,它们拥有更高的土壤生产力和有机碳输入[58,63]。而由于这些颗粒被最先被风力带走,土壤的持水力以及有机质含量和土壤营养状况都会明显下降。土壤细颗粒中稳定的 SOC 含量较高,研究表明,风蚀物质中 SOC 的含量是表层土壤 SOC 含量的 1.3 到 5.0 倍[70-74]。土壤有机质中的 SOC、总氮、可利用氮和 SO_4^{2-} 在风蚀作用中是最早被损坏并进行重新分配的;而部分阳离子如 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 并没有表现出明显的转移和重新分配变化;其他离子如 K^+、Na^+ 和 Cl^- 则没有明显的形态变化[51]。风蚀导致的营养物质的流失要高于土壤的流失,研究表明,未被侵蚀的弱发育半干润软土(Haplustolls)在经受风蚀后会转变为半干润淡色始成土(Ustochrepts),因为风蚀会导致土壤有机质大量流失、表层土壤厚度变薄[75-76]。

对新墨西哥南部的荒漠化草原实验区进行的研究表明,在 3 个风季里,风力作用导致无草覆盖区地表 5cm 土壤中占 25%的 C、N 流失,而这些损失的 60%发生在第一个风季;无草覆盖区的地表和 25%草地覆盖区的地表土壤养分的流失极为严重;2 至 3 年以上的风力作用会明显改变 SOC 和其它土壤养分的空间异质性,风力作用的增强导致 SOC 和土壤养分的变化可能会持续并增强土壤与灌木的相关性,从而对这个荒漠化草地的荒漠化形成正反馈[77]。在阿根廷的潘帕斯半干旱草原上,由于风力作用土壤总碳含量和总氮含量在 86 年内损失了 60%,仅仅只有 40%被作物吸收[75]。对于风力作用对土壤磷元素含量的影响,有研究表明,风速较低时,土壤损失的磷元素要多于氮元素,但是在风力作用较强的情况下,由于风力作用导致的从土壤中流失的氮元素要比磷元素高很多,主要原因是因为风速的大小控制着土壤氮元素的流失量[38,75,77]。

4　风速变化对微气候的影响

微气候是由小规模的大气和地表边界层土壤的演化决定的,而大气和土壤的演化包括植物和土壤对辐射能量的吸收和释放,风与植物及地表边界层的相互作用引起物质与能量的转移或流动[78-82]。湍流风可以改变大气边界层条件、风速、湍流之间的混合作用,直接影响垂直的能量分布(热量)和大气与地表边界层之间的能量交换,从而影响地表微气候[83]。

在全球尺度来讲,大气循环驱动着每天的天气状况;从微尺度来讲,在任意地表面都有一个非常薄的空气层(几毫米甚至更少),就是在这个空气层里由边界层的扩散过程控制着物质的转移过程——连接这两个尺度的就是地面风[47]。地面风影响着风力作用、植物生长和发育以及植物的环境[47]。风与近地表微气候的互相作用受地表粗糙度的影响。不同类型的草原地表粗糙度不同,影响着风的湍流模式,而不同的风力则会导致微气候发生不同的变化。相关物理学研究表明,荒漠草原的地表温度和近地层气温相对较高,而灌木较为浓密的地区则相对较低,反映出在中纬度干旱区高覆盖植被向稀疏植被的退化,会带来近地层增暖趋势。而这种增暖趋势主要源于稀疏植被增大的空气动力学阻抗和增大的波文比贡献, 并抵消了稀疏植被净辐射减小的降温效应[28]。

风速的变化会影响地表边界层的湿度和潜在的生物气体(CO_2、CH_4和 N_2O)浓度[83-84]。风速减小会使地表边界层厚度增加,热量和水汽的交换速率降低,从而改变近地表微气候,影响植物生长和其它的生态系统过程[85]。采取防风措施会阻碍风的流动、降低风速并改变风的流动模式,在设置风障的地区,背风面风速明显下降,导致湍流传输率发生变化,土壤表面热传导速率下降,一般情况下,白天背风面土壤温度略高于迎风面土壤温度,而夜间由于大气的平流作用和垂直运动,背风面温度则低于迎风面温度;但是,由于太阳辐射、太阳高度角、日照时长、湿度、地形、坡度和坡向等环境因素都能导致近地表微气候发生变化,而风障对植被的影响不只是降低风速,也会对其他多种因素产生影响,所以在综合各种因子的影响下背风面与迎风面的土壤温度可能会出现不同的变化模式[82,86-89]。研究表明风力作用会引起土壤湿度的变化,而土壤湿度的变化则会导致地表与大气边界层之间发生热量和水汽交换,从而引起地表及其上空低层大气温度的变化,改变近地表微气候[58,90]。风速的变化和植被土壤之间的相互作用导致了地表温度和湿度的变化,风速降低的地区,呈现白天温度较高,晚上温度较低的趋势;风速明显较强的地区在早春、夏季中后期和秋季早期较为干旱,土壤水分含量较低,后半夏是无雨期的可能性明显高于其他风力较弱的地区[91]。

5　风速变化对生态系统结构的影响

干旱半干旱草原生态系统环境较为脆弱,对气候条件依赖性极强,作为一种普遍存在的气候因子,风速变化直接或间接影响着气温和降水,而无论是气温还是降水都对植被的生长以及植被群落的组成和结构有着重要的影响[92-95]。

由于风力作用导致土壤水分亏缺,草地沙漠化,植物物种生活型复杂化——风力作用导致的风蚀影响较小的草地上建群植物主要是多年生草本植物;风蚀影响较大的草地上由于风力作用导致地面水分含量较少,

因此需水量较少且耐旱程度相对较高的蒿类半灌木会逐渐取代多年生草本成为建群植物;风速过大导致土壤沙化严重的草地,多年生草本植物减少,而能够高度顺应气候波动性、水分利用效率极高、种子能在寒冷季节休眠越冬、在降水量十数毫米的不利条件下也能迅速完成生活史的一年生草本植物根据当地气候条件的不同呈现出不同程度的增加趋势,甚至由于全年降水稀少,干燥多风,代表植物主要以旱生、超旱生灌木和半灌木(如棉刺、霸王、沙竹、珍珠等)为主,处于优势地位[96-97]。

榆林风沙草滩区气候干旱,冷热剧变,该区风速大且土壤含沙量高,年平均风速 2—3.2 m/s, 冬春以西北风为主,风沙区风力可达 6—7 级,可持续 70 d 左右,研究区内草本植物占总数的 47.1%,半灌木占总数的 30.03%[98]。科尔沁沙地草地属温带半干旱大陆性季风气候,由于风速大,导致该区域风蚀沙化严重,呈现不同幅度的草地退化:疏林草地物种数 18 种,沙质草地 17 种,而半流动沙地减少到 9 种,到流动沙地仅有 4 种;而在这些不同的逆行演替阶段,一年生和二年生草本呈增加趋势,多年生草本减少(在流动沙地又有所增加),灌木也相应的增加(在流动沙地又有下降)(图 1)[99]。可以看出,受风蚀沙化的影响,草地上单位面积分布的植被物种数量逐渐减小,草地覆盖度降低,长年风速较大、风蚀沙化严重的草地物种丰富度相对较低,多样性和均匀性也相应下降,植物群落间的相似性降低,半灌木和半灌木类植物的出现和增加改变了草地的景观异质性[96,100-102]。

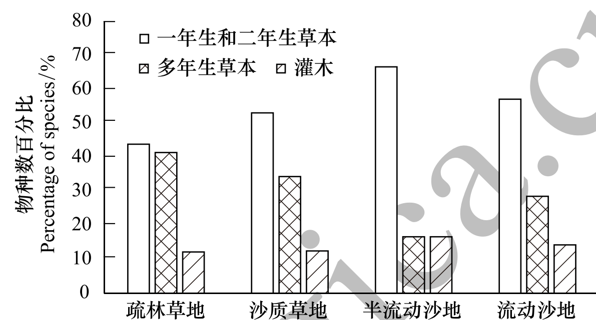


图 1 科尔沁不同退化阶段草地植物物种数百分比[99]

Fig.1 Percentage of Plant Species in Different Degradation Stage of Horqin[99]

通过金东艳[85]以及本研究组在内蒙古典型草原上进行的围封样地挡风板前后群落样方调查显示,风障的适当影响能够促进植物花粉传播,在一定程度上使得草本植物物种丰富度得到增加,而风速几乎全部受到遮蔽的区域,物种丰富度相对较小。结合其他相关研究可见,风速大小对草原植物的物种丰富度有着较大影响,受到长期较高风速影响的草地物种丰富度会随之降低,而无风或较低风速却有助于物种丰富度的增加,影响物种多样性。也就是说,风速大小对于草原生态系统结构的影响存在一个相对较为稳定的阈值。

6 风速变化对碳通量的影响

气候是影响生态系统碳通量的主要因素之一,风力作用在吸收 CO_2 等温室气体方面有着重要贡献——植物通过风力作用与大气产生气体交换,通过光合作用固定 CO_2[103]。Montaldo 对西地中海的西北方向来风米斯特拉尔进行观测,并利用涡度相关法对该区域撒丁岛进行了相关测定,结果表明:该地区夏季风速呈下降趋势且风向发生变化,进而导致了地表面通量——蒸散发和碳通量发生变化[104]。

风速的大小直接决定了大气的稳定性,从而调节地表与大气间 CO_2 的交换速率。尽管在轻度干旱条件下气孔关闭会导致净 CO_2 吸收以及其他测量值减小,但是,白天净生态系统碳交换的减小主要还是受风速增强的影响——当风速较小,大气稳定性较高,CO_2 的排放受边界层阻力影响而下降;当风速较大,大气稳定性减小,CO_2 交换速率也会随着湍流的加强而增加,CO_2 从土壤中的释放增强而生态系统的吸收能力降低[105-106]。

而在西班牙东南部半干旱草原的实验观测中发现,风速变化只能在白天促进 CO_2 从土壤中释放,夜晚由于机械性湍流对对流湍流的压力导致风速无法对碳释放产生影响[106]。金东艳的研究表明,在生长季,受到风障保护的植物群落碳吸收能力明显高于没有风障保护的植物群落,除了风速的直接影响,由于风速的改变导致的土壤水分和温度的变化也会间接影响生态系统的碳吸收和碳释放过程[65]。风速大小引起的土壤风蚀作用也会导致地表的土壤成分进行重新分配从而促进碳循环过程[107]。研究组在内蒙古典型草原上利用挡风设施进行的风速下降对草原生态系统碳通量影响的实验观测表明,日间风速较大的迎风面草原生态系统的

生态系统呼吸速率、土壤呼吸速率以及生态系统净碳交换量均低于风速较低的背风面。

7 研究展望

结合以上几个方面我们目前可以得出,风速变化对草原生态系统的植物生理性状和生长发育、土壤结构、土壤的水分、土壤养分、地表微气候、生态系统结构以及生态系统碳通量等方面都会产生直接或间接的影响,从而影响到整个草原生态系统的生产力以及生态系统可持续发展。近年来针对风速变化对全球生态系统影响的研究正在逐渐增多,表明国内外学者逐渐开始关注风速变化对生态系统的影响研究,综合国内外文献,可以认为风速变化对草原生态系统的研究今后的发展趋势集中在以下几个方面:

(1)研究对象的多样化发展　风速变化对草原生态系统影响的研究正在逐年增多,但相关研究对象多偏重荒漠草原等风蚀现象严重的区域[105-106],而针对典型草原生态系统的相关研究较少[105-106],而典型草原作为草原生态系统的重要组成部分,其地理位置大多位于干旱半干旱区域,受到风速变化的作用影响较为显著,因此研究的对象应该多样化。

(2)从定性研究向定量化研究发展　目前关于风速变化对草原生态系统影响研究逐渐从定性的常识问题研究逐渐过渡到定量化的研究。已经有学者设置了相关的野外观测实验,利用定点观测和控制实验相结合的研究方法,进行了更为深入和详细的实验研究,并取得一定的实验结果[105-106],风速变化对于草原生态系统不同方面有着不同的影响,风速增强能够在一定程度上增加植被物种丰富度,但却也会对草原生态系统碳交换产生一定的抑制作用,因此,风速变化对于草原生态系统的影响是利弊相当,不同风速会对其产生各种不同影响,而这些方方面面都影响着整个草原生态系统的发展。与此同时,随着科学技术的进步、实验仪器的精进和控制实验的进一步发展,在微观层面的研究也愈加深入和全面,相较于过去几十年的研究,在量化影响与作用方面也趋于更加精确[105-106]。因此,从定量化的角度深入探讨风速大小及相关阈值对于草原生态系统的定量影响也是今后研究的重点方面和发展趋势。

(3)研究问题由单一向综合化发展　就草原生态系统层面来看,国内外学者关于风速变化对草原生态系统影响的研究涉及层面较为广泛,但都是侧重于某个单一的要素,例如风蚀作用对区域土壤结构、养分和水分的影响,风速变化对植被群落演替过程的影响,目前逐渐过渡到风速变化对于生态系统整体的研究;在风速变化对植物生理性状影响的方面,研究重心从集中于风速变化对植物的直接机械影响研究逐渐转向更深层次的研究,加强了风与植物间相互作用的内部机理及过程的研究[105-106];因此,从植物个体、群落结构、土壤性质等要素分开研究逐渐向风速变化对草原生态系统的综合性研究,尤其是多要素之间的相互作用机理的研究成为今后重要的发展趋势。

(4)整体结构和功能性研究趋势　目前,生态系统服务功能与人类福祉是人们研究和关注的重点问题,风速变化对草原生态系统的研究也随之趋向于更大层次的整体结构和功能性研究;综合目前国内外研究,现如今,风速降低已成为全球化趋势,针对风速变化对草原生态系统碳通量、生物多样性等方面的研究已经有所涉足[105-106],在全球变暖和碳排放增加的全球变化大背景下,研究风速变化对草原生态系统温室气体排放、草原生态系统群落结构、草原生态系统物种多样性的影响,以及风速变化对草原生态系统一系列影响所造成的草原生态系统服务价值变化研究也将成为今后发展的重中之重和必然发展趋势。

参考文献(References):

[1] 田青. 草原生态系统研究的方法与实践. 北京: 中国林业出版社, 2014:1-2.
[2] 梁艳, 干珠扎布, 张伟娜, 高清竹, 旦久罗布. 气候变化对中国草原生态系统影响研究综述. 中国农业科技导报, 2014(2): 1-8.
[3] 闵庆文, 刘寿东, 杨霞. 内蒙古典型草原生态系统服务功能价值评估研究. 草地学报, 2004, 12(3): 165-169.
[4] 杨婧. 放牧对典型草原生态系统服务功能影响的研究: 内蒙古农业大学, 2013.
[5] 何亚婷, 董云社, 齐玉春, 肖胜生, 刘欣超. 草地生态系统土壤微生物量及其影响因子研究进展. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1350-1359.
[6] Campana P E, Li H, Yan J. Techno-economic feasibility of the irrigation system for the grassland and farmland conservation in China: Photovoltaic

vs. wind power water pumping. Energy Conversion & Management, 2015, 103: 311-320.
[7] Akiyama T, Kawamura K. Grassland degradation in China: methods of monitoring, management and restoration. Grassland Science, 2007, 53(1): 1-17.
[8] Ravi S, D'Odorico P, Breshears D D, Field J P, Goudie A S. Aeolian processes and the biosphere. Reviews of Geophysics, 2011, 49(3): 114-123.
[9] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, Huenneke L F, Jarrell W M. Biological feedbacks in global desertification. Science, 1990, 247(4946): 1043-1048.
[10] D'Almeida G A. A Model for Saharan Dust Transport. Journal of Applied Meteorology, 1986, 25(7): 903-916.
[11] Gillette D A, Hanson K J. Spatial and temporal variability of dust production caused by wind erosion in the United States. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1989, 94(D2): 2197-2206.
[12] Goudie A S. Dust storms in space and time. Progress in Physical Geography, 1983, 7(4): 502-530.
[13] 董治宝, 高尚玉, 董光荣. 土壤风蚀预报研究述评. 中国沙漠, 1999, 19(4): 312-317.
[14] Iacono, M.J. Why is the Wind Speed Decreasing? Blue Hill Meteorological Observatory. (2009-09) [2016-12-31]. http://www.bluehill.org/climate/200909_Wind_Speed.pdf.
[15] Mcvicar T R, Niel T G V, Li L T, Roderick M L, Rayner D P. Wind speed climatology and trends for Australia, 1975-2006: Capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output. Geophysical Research Letters, 2008, 35(20): 288-299.
[16] Pirazzoli P A, Tomasin A. Recent near-surface wind changes in the central Mediterranean and Adriatic areas.International Journal of Climatology, 2003, 23(8): 963-973.
[17] Pryor S C, Barthelmie R J, Young D T, Takle E S, Arritt R W. Wind speed trends over the contiguous United States. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009, 114(D14): 1159-1171.
[18] Pryor S C, Ledolter J. Addendum to "Wind speed trends over the contiguous United States". Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D10): 1159-1171.
[19] Tuller S E. Measured wind speed trends on the west coast of Canada. International Journal of Climatology, 2004, 24(11): 1359-1374.
[20] Mcvicar T R, Roderick M L, Donohue R J, Li L T, Niel T G V. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. Journal of Hydrology, 2012, s 416-417(3): 182-205.
[21] Guo H, Xu M, Hu Q. Changes in near-surface wind speed in China: 1969–2005. International Journal of Climatology, 2011, 31(3): 349-358.
[22] 郭春燕. 近50年内蒙古自治区风速变化周期及突变分析. 干旱区资源与环境, 2015, 29(9): 154-158.
[23] 江滢, 罗勇, 赵宗慈. 全球气候模式对未来中国风速变化预估. 大气科学, 2010, 34(2): 323-336.
[24] 江滢, 罗勇, 赵宗慈. 中国及世界风资源变化研究进展. 科技导报, 2009, 27(13): 96-104.
[25] Mayaud J R, Wiggs G F S, Bailey R M. Characterizing turbulent wind flow around dryland vegetation. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41(10): 1421-1436.
[26] Mahrooz R, Abdolmajid S, Rashid F S S, Harm B. Remote sensing of land use/cover changes and its effect on wind erosion potential in southern Iran. Peerj, 2016, 4(1): e1948.
[27] Joseph M, 2010. Why winds are slowing. Nature, (2010-10-17) [2016-12-31] . http://www.nature.com/news/2010/101017/full/news.2010.543.html.
[28] 李宏宇, 符淙斌, 郭维栋, 马芳. 干旱区不同下垫面能量分配机理及对微气候反馈的研究. 物理学报, 2015, 65(5): 59201-1-59201-14.
[29] Xu M, Chang C P, Fu C, Qi Y, Robock A. Steady decline of east Asian monsoon winds, 1969–2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111(D24): 906-910.
[30] Cleugh H A, Miller J M, Böhm M. Direct mechanical effects of wind on crops. Agroforestry Systems, 1998, 41(1): 85-112.
[31] Grace J. Plant response to wind. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1988, 22-23: 71-88.
[32] Van Gardingen P, Grace J. Plants and wind. Advances in Botanical Research, 1991, 18: 189-253.
[33] Knight M R, Smith S M, Trewavas A J. Wind-induced plant motion immediately increases cytosolic calcium. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1992, 89(11): 4967-4971.
[34] 于云江, 史培军, 鲁春霞, 刘家琼. 不同风沙条件对几种植物生态生理特征的影响. 植物生态学报, 2003, 27(1): 53-58.
[35] 张琳琳, 赵晓英, 原慧. 风对植物的作用及植物适应对策研究进展. 地球科学进展, 2013, 28(12): 1349-1353.
[36] Ennos A R. Wind as an ecological factor. Trends in Ecology & Evolution, 1997, 12(3): 108-111.
[37] Jaffe M J. Thigmomorphogenesis: the response of plant growth and development to mechanical stimulation: with special reference to bryonia dioica. Planta, 1973, 114(2): 143-157.
[38] James K R, Haritos N, Ades P K. Mechanical stability of trees under dynamic loads. American Journal of Botany, 2006, 93(10): 1522-1530.
[39] Armbrust D V. Physiological responses to wind and sandblast damage by grain sorghum plants. Agronomy Journal, 1982, 74(1): 133-135.
[40] Pitcairn C E R, Jeffree C E, Grace J. Influence of polishing and abrasion on the diffusive conductance of leaf surface of *Festuca arundinacea* schreb. Plant, Cell &Environment, 1986, 9(3): 191-196.
[41] Rosenberg N J. Microclimate, air mixing and physiological regulation of transpiration as influenced by wind shelter in an irrigated bean field.

Agricultural Meteorology, 1966, 3(3/4): 197-224.
[42] Daudet F A, Sinoquet H, Le R X, Adam B. Wind speed and leaf boundary layer conductance variation within tree crown. Consequences on leaf-to-atmosphere coupling and tree functions. Agricultural & Forest Meteorology, 1999, 97(3): 171-185.
[43] 赵哈林, 何玉惠, 岳广阳, 周瑞莲. 风吹、沙埋对沙地植物幼苗生长和光合蒸腾特性的影响. 生态学杂志, 2010, 29(3): 413-419.
[44] 曲浩, 赵学勇, 岳广阳, 王少昆. 科尔沁沙地几种常见植物对风胁迫的生理响应. 中国沙漠, 2009, 29(4): 668-673.
[45] 于云江, 史培军, 贺丽萍, 刘家琼. 风沙流对植物生长影响的研究. 地球科学进展, 2002, 17(2): 262-267.
[46] 于云江, 辛越勇, 刘家琼, 于志勇. 风和风沙流对不同固沙植物生理状况的影响. 植物学报, 1998, 40(10): 962-968.
[47] Brandle J R, Hodges L, Zhou X H. Windbreaks in North American agricultural systems. Agroforestry System, 2004, 61(1): 65-78.
[48] Kort J. Benefits of windbreaks to field and forage crops. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1988, 22-23(7): 165-190.
[49] Ogbuehi S N, Brandle J R. Influence of Windbreak-Shelter on Soybean Growth, Canopy Structure, and Light Relations1. Crop Science, 1982, 22(2): 269-273.
[50] Hodges L, Suratman M N, Brandle J R, Hubbard K G. Growth and yield of snap beans as affected by wind protection and microclimate changes due to shelterbelts and planting dates. HortScience, 2004, 39(5): 996-1004.
[51] Li J, Okin G S, Alvarez L, Epstein H. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities. Biogeochemistry, 2008, 88(1): 73-88.
[52] Li J, Okin G S, Epstein H E. Effects of enhanced wind erosion on surface soil texture and characteristics of windblown sediments. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009, 114(G2): 157-163.
[53] Larney F J, Bullock M S, Janzen H H, Ellert B H, Olson E C S. Wind erosion effects on nutrient redistribution and soil productivity. J Soil Water Conserv. Journal of Soil & Water Conservation, 1998, 53(2): 133-140.
[54] 刘连友, 王建华, 李小雁, 刘玉璋, 拓万权. 耕作土壤可蚀性颗粒的风洞模拟测定. 科学通报, 1998(15): 1663-1666.
[55] Colazo J C, Buschiazzo D E. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. Geoderma, 2010, 159(1/2): 228-236.
[56] Lal R. Soil degradation by erosion. Land Degradation & Development, 2001, 12(6): 519-539.
[57] Wang X, Wang G, Lang L, Hua T, Wang H. Aeolian transport and sandy desertification in semiarid china: a wind tunnel approach. Land Degradation & Development, 2013, 24(6): 605-612.
[58] Colazo J C, Buschiazzo D. The Impact of Agriculture on Soil Texture Due to Wind Erosion. Land Degradation & Development, 2015, 26(1): 62-70.
[59] Avecilla F, Panebianco J E, Buschiazzo D E. Variable effects of saltation and soil properties on wind erosion of different textured soils. Aeolian Research, 2015, 18: 145-153.
[60] Leys J, Mctainsh G. Soil loss and nutrient decline by wind erosion - Cause for concern. Australian Journal of Soil & Water Conservation, 1994,7: 30-35.
[61] Lyles L, Tatarko J. Wind erosion effects on soil texture and organic matter. Journal of Soil & Water Conservation, 1986, 41(3): 191-193.
[62] 闫玉春, 唐海萍, 张新时, 王旭, 王海祥. 基于土壤粒度分析的草原风蚀特征探讨. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1263-1268.
[63] Saxton K E, Rawls W J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1569-1578.
[64] 高鹏程, 张国云, 孙平阳. 土壤水分蒸发与吹风的关系. 西北林学院学报, 2004, 19(3): 89-91.
[65] Jin D Y, Gao Q, Wang Y L, Xu L. Impacts of reduced wind speed on physiology and ecosystem carbon flux of a semi-arid steppe ecosystem. Sciences in Cold and Arid Regions, 2014, 6(6): 556-565.
[66] 张文君, 谭桂容. 全球变暖形势下中国陆表水分的变化. 大气科学学报, 2012, 35(5): 550-563.
[67] NoyMeir I. Structure and function of desert ecosystems. Israel Journal of Plant Sciences, 1979, 28(1):1-19.
[68] Coppinger K D, Reiners W A, Burke I C, Olson R K. Net erosion on a sagebrush steppe landscape as determined by cesium-137 distribution. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(1): 254-258.
[69] Schlesinger W H, Raikes J A. On the Spatial Pattern of Soil Nutrients in Desert Ecosystems. Ecology, 1996, 77(4): 364-374.
[70] Lobe I, Amelung W, Du Preez C C. Losses of carbon and nitrogen with prolonged arable cropping from sandy soils of the south African Highveld. European Journal of Soil Science, 2001, 52(1): 93-101.
[71] Pimentel D, Kounang N. Ecology of Soil Erosion in Ecosystems. Ecosystems, 1998, 1(5): 416-426.
[72] Rosell R A, Galantini J A, Suñer L G. Long-term crop rotation effects on organic carbon, nitrogen, and phosphorus in Haplustoll soil fractions. Arid Soil Research and Rehabilitation, 2000, volume 14(4): 309-315.
[73] Wu J, Zhang X, Wang Y, Xu D. The effects of land use changes on the distribution of soil organic carbon in physical fractionation of soil. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(4): 19-29.
[74] 苏永中, 赵哈林. 农田沙漠化过程中土壤有机碳和氮的衰减及其机理研究. 中国农业科学, 2003, 36(8): 928-934.
[75] Buschiazzo D E, Zobeck T M, Abascal S A. Wind erosion quantity and quality of an Entic Haplustoll of the semi-arid pampas of Argentina. Journal of Arid Environments, 2007, 69(1): 29-39.
[76] 冯晓静, 高焕文, 李洪文, 王晓燕, 马洪亮. 北方农牧交错带风蚀对农田土壤特性的影响. 农业机械学报, 2007, 38(5): 51-54.

[77] Li J R, Okin G S, Alvarez L, Epstein H. Quantitative effects of vegetation cover on wind erosion and soil nutrient loss in a desert grassland of southern New Mexico, USA. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 317-332.
[78] Sutton O G. Micrometeorology. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1953, 79(341): 457.
[79] Moore K G,Munn R E. Descriptive micrometeorology. Advances in Geophysics. Agricultural Meteorology, 1967, 4(3): 212-213.
[80] Mobbs S D. Introduction to micrometeorology. International Journal of Climatology, 1991, 11(2): 223-224.
[81] Priestley C H B. Turbulent Transfer in the Lower Atmosphere. Chicago: The University of Chicago Press, 1959:130-139.
[82] 瑞布雷, 王仁忠. 论草原生态系统中微气候研究的重要作用. 东北师大学报(自然科学), 1996(2): 88-93.
[83] Armstrong A, Waldron S, Whitaker J, Ostle N J. Wind farm and solar park effects on plant-soil carbon cycling: uncertain impacts of changes in ground-level microclimate. Global Change Biology, 2014, 20(6): 1699-1706.
[84] Roy S B, Pacala S W, Walko R L. Can large wind farms affect local meteorology? Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2004, 109(D19): 4099-4107.
[85] 金东艳, 高琼. 风速及刈割对草原土壤水分与生产力的影响. 干旱区研究, 2015, 32(3): 461-466.
[86] Cleugh H A, Hughes D E. Impact of shelter on crop microclimates: a synthesis of results from wind tunnel and field experiments. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2002, 42(6): 679-701.
[87] Cleugh H A. Field measurements of windbreak effects on airflow, turbulent exchanges and microclimates. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2002, 42(6): 665-677.
[88] Mcnaughton K G. Effects of windbreaks on turbulent transport and microclimate. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1988, 22-3: 17-39.
[89] 严开伟, 章澄昌, 王淑芳. 京郊冬春季节风障微气象效应的研究. 北京大学学报自然科学版, 1961(1): 27-44.
[90] 詹艳玲, 林朝晖. 6月长江中下游降水和春季东亚季风区土壤湿度的关系. 气象学报, 2012, 70(2): 236-243.
[91] Mezosi G, Szatmari J. Assessment of wind erosion risk on the agricultural area of the southern part of Hungary. Journal of Hazardous Materials, 1998, 61(1): 139-153.
[92] Boutton T W, Tieszen L L, Imbamba S K. Biomass dynamics of grassland vegetation in kenya. African Journal of Ecology, 1988, 26(2): 89-101.
[93] 韩芳, 牛建明, 刘朋涛, 那日苏, 张艳楠. 气候变化对内蒙古荒漠草原牧草气候生产力的影响. 中国草地学报, 2010, 32(5): 57-65.
[94] 何京丽, 珊丹, 梁占岐, 邢恩德, 赵瑞莲. 气候变化对内蒙古草甸草原植物群落特征的影响. 水土保持研究, 2009, 16(5): 131-134.
[95] 牛建明. 气候变化对内蒙古草原分布和生产力影响的预测研究. 草地学报, 2001, 9(4): 277-282.
[96] 徐永明, 吕世海. 风蚀沙化对草原植被生物多样性的影响——以呼伦贝尔草原为例. 干旱区资源与环境, 2011, 25(4): 133-137.
[97] Jian-Hua S, Feng Q, Chang Z Q, Wang Y B, Tian Y Z. Community Structure and Species Diversity of Desert Plants in the Wind-sand Area of Yabulai. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(3): 602-608.
[98] Liang C, Liu Z, Zhu Z, Wang W. Specific diversity and distribution characteristics of annual synusia in Alashan desert. The Journal of Applied Ecology, 2003, 14(6): 897-903.
[99] 左小安, 赵学勇, 赵哈林, 郭轶瑞, 李玉强. 科尔沁沙地草地退化过程中的物种组成及功能多样性变化特征. 水土保持学报, 2006, 20(1): 181-185.
[100] 吕世海. 呼伦贝尔沙化草地系统退化特征及围封效应研究: 北京林业大学, 2005.
[101] 曹成有, 寇振武, 蒋德明, 骆永明, 丁小平. 科尔沁沙地丘间地植被演变的研究. 植物生态学报, 2000, 24(3): 7-12.
[102] 陈生永. 沙地植被演替研究成果综述. 山西水土保持科技, 2001(4): 23-26.
[103] Jones N F, Pejchar L, Kiesecker J M. The Energy Footprint: How Oil, Natural Gas, and Wind Energy Affect Land for Biodiversity and the Flow of Ecosystem Services. Bioscience, 2015, 1(3): 226-229.
[104] Montaldo N, Oren R. Anywhere the wind blows does really matter to net ecosystem carbon exchange// EGU General Assembly Conference Abstracts. Austria: EGU, 2013(15):6994.
[105] 李国栋, 张俊华, 陈聪, 田海峰, 赵丽萍. 气候变化背景下中国陆地生态系统碳储量及碳通量研究进展. 生态环境学报, 2013(5): 873—878.
[106] Rey A, Belelli-Marchesini L, Were A, Serrano-Ortiz P, Etiope G, Papale D, Domingo F, Pegoraro E. Wind as a main driver of the net ecosystem carbon balance of a semiarid mediterranean steppe in the south east of Spain. Global Change Biology, 2012, 18(2): 539-554.
[107] 高静静. 风蚀和放牧对温带草原碳循环的影响: 河南大学, 2013.